

基于滑模观测器的并网逆变器无交流电压传感器模型预测控制

郭磊磊¹, 金楠¹, 李琰琰¹, 代林旺², 王华清¹, 章凯旋¹

(1. 郑州轻工业大学 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 中国电力科学研究院有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘要: 为了提高并网逆变器的运行可靠性,降低交流电压传感器故障的影响,研究并提出了一种基于滑模观测器和双低通滤波器的电网电压频率自适应观测方法,并设计了一种基于电网电压观测值的并网逆变器模型预测电流控制策略。所提电网电压观测方法克服了频率偏差对电网电压观测的影响,提高了电网电压观测精度。同时,由于低通滤波器的使用,电网电压背景谐波对电流控制的影响也得到一定程度的抑制。通过详细的对比实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 并网逆变器;滑模观测器;无交流电压传感器;模型预测控制;低通滤波器

中图分类号: TM 464

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202005010

0 引言

近年来,作为风电、光伏等新能源发电系统并网运行的关键设备,并网逆变器得到广泛应用^[1-3]。如何优化并网逆变器的控制策略并提高并网逆变器的运行可靠性,已成为当前的研究热点。

目前,常用的并网逆变器控制主要有矢量控制和直接功率控制等。矢量控制需要较为复杂的坐标变换和脉冲调制模块,且需要合理设计和调试控制器参数。直接功率控制需要较高的采样频率,且开关频率不恒定、谐波较大。近年来,模型预测控制因具有控制灵活、实现简单等优点而在并网逆变器控制中得到广泛应用^[4-6]。然而,无论是矢量控制、直接功率控制还是模型预测控制,均至少需要5个传感器以采集电压、电流等反馈信号,包括2个交流电压传感器、2个交流电流传感器和1个直流电压传感器。传感器一旦发生故障,必然会导致控制系统失稳,进而大幅降低新能源并网系统的可靠性。

为了提高并网逆变器的运行可靠性,降低传感

器故障的影响,文献[7-20]研究了并网逆变器无交流电压传感器的控制方法。一般而言,这种方法可以分为2类,即基于虚拟磁链观测法^[7-14]和基于电网电压观测法^[15-20]。

文献[7-14]研究了基于虚拟磁链观测的无交流电压传感器控制方法。其中,文献[7]提出了一种基于虚拟磁链的脉宽调制整流器模型预测控制方法,该方法采用纯积分算法进行虚拟磁链观测,但纯积分算法受积分初始值和直流偏置的影响较大。为此,文献[8]提出了一种采用低通滤波器代替纯积分的虚拟磁链观测方法,但该方法会引入相位和幅值偏差。文献[9-11]提出了一种带反馈补偿的虚拟磁链观测方法,可以克服积分初始值的影响,但该方法的磁链观测精度受反馈限幅器的影响较大。为了解决纯积分算法存在的主要问题,并实现虚拟磁链的准确观测,文献[12-14]研究了基于二阶广义积分器的虚拟磁链观测方法,但这类方法对频率变化较敏感。

文献[15-20]研究了基于电网电压观测的无交流电压传感器控制方法。其中,文献[15-16]研究了基于神经网络观测器的电网电压观测方法。这类方法虽然可以获得较好的电网电压观测精度,但需要在线调整多个观测器参数,调试和实现均较复杂。为此,文献[17-18]研究了基于状态观测器的电网电压观测方法。然而,状态观测器的反馈矩阵设计较为复杂,不合适的反馈矩阵易导致状态观测器发散。考虑到滑模观测器具有设计简单、鲁棒性强、收敛速度快等优点,文献[19-20]研究了基于滑模观测器的电网电压观测方法,但该方法对电网频率偏差也较为敏感。虽然文献[21-22]研究了电网电压频率自适应观测方法,但这类方法实现较为复杂,且一旦频

收稿日期:2020-01-30;修回日期:2020-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707176);新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)开放基金资助项目;河南省高等学校重点科研项目(18A470020,20A470011);河南省青年人才托举工程项目(2019HYTP021)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707176),the Open Fund of State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems(China Electric Power Research Institute),the High School Key Research Program of Henan Province(18A470020,20A470011) and the Youth Talent Support Project of Henan Province(2019HYTP021)

率观测出现误差,就会增大电网电压幅值和相位的观测误差。

为了实现并网逆变器的无交流电压传感器模型预测控制,降低电网电压观测对频率偏差的灵敏性,本文提出了一种改进的基于滑模观测器的电网电压观测方法。该方法采用双低通滤波器实现电网电压的自适应补偿,从而消除了频率偏差对电网电压观测的影响,提高了电网电压观测精度。同时,由于使用了双低通滤波器,电网背景谐波对电流控制的影响也得到一定的抑制。实验结果验证了所提方法的有效性。

1 常规的模型预测控制方法

两电平并网逆变器的电路拓扑结构如图1所示。图中, U_{dc} 为直流侧电压; L 为滤波电感; R 为滤波电感上的寄生电阻; e_a 、 e_b 、 e_c 为电网电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为并网电流; n 为电网中性点; N 为直流母线负端。考虑到逆变器共有8种不同的开关状态,对应可产生8个电压矢量 $u_0 \sim u_7$ 。

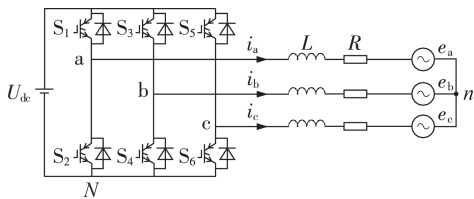


图1 并网逆变器电路拓扑结构

Fig.1 Topology structure of grid-connected inverter circuit

由并网逆变器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型可得:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} + \frac{T}{L} \begin{bmatrix} u_\alpha(k) - e_\alpha(k) \\ u_\beta(k) - e_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 和 $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 分别为 k 时刻和 $k+1$ 时刻采样电流的 α 、 β 轴分量; $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 和 $e_\alpha(k)$ 、 $e_\beta(k)$ 分别为 k 时刻逆变器输出电压和电网电压的 α 、 β 轴分量; T 为采样周期。

在进行实际预测控制时,可根据式(1)采用 k 时刻作用的电压矢量预测 $k+1$ 时刻电流,以实现延时补偿。再根据预测的电流 $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 和式(2)预测 $k+2$ 时刻的电流 $i_\alpha(k+2)$ 、 $i_\beta(k+2)$,即:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+2) \\ i_\beta(k+2) \end{bmatrix} = \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L} \begin{bmatrix} u_\alpha(k+1) - e_\alpha(k+1) \\ u_\beta(k+1) - e_\beta(k+1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑到采样频率较高,电网电压变化较慢,预测时可近似认为 $e(k+1)=e(k)$ 。实际进行预测控制时,

需将逆变器输出的8个电压矢量依次代入式(2)中进行电流预测,并将预测结果代入如式(3)所示的目标函数中进行误差评估,从而选择一个使目标函数最小的电压矢量作为最优矢量。

$$g = \left| i_{\alpha\text{ref}} - i_\alpha(k+2) \right| + \left| i_{\beta\text{ref}} - i_\beta(k+2) \right| \quad (3)$$

其中, $i_{\alpha\text{ref}}$ 、 $i_{\beta\text{ref}}$ 分别为电流参考值的 α 、 β 轴分量。

并网逆变器常采用电网电压定向矢量控制,以实现有功功率和无功功率的解耦。控制系统直接给定 d 、 q 轴有功和无功电流参考值 $i_{d\text{ref}}$ 、 $i_{q\text{ref}}$,根据式(4)计算得:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha\text{ref}} \\ i_{\beta\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d\text{ref}} \\ i_{q\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, θ 为电网电压矢量的角度,可根据电网电压信号计算得到,如式(5)所示。

$$\theta = \arctan(e_\beta/e_\alpha) \quad (5)$$

由此可见,常规的控制方法需要至少2个交流电压传感器来采样电网电压,以实现电流预测和解耦控制。一旦交流电压传感器出现故障,并网逆变器的模型预测控制系统将无法正常运行。因此,为了提高并网逆变器的运行可靠性,需要研究无交流电压传感器的模型预测控制方法。

2 电网电压观测方法

与状态观测器相比,滑模观测器具有设计简单、鲁棒性强、收敛速度快等诸多优点。因此,诸多文献研究了基于滑模观测器的电网电压观测方法^[19-20]。

2.1 常规的电网电压观测方法

根据并网逆变器的数学模型,可设计如式(6)所示滑模观测器以观测电网电压。

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ M \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, \hat{i}_α 、 \hat{i}_β 分别为观测的电网电流 α 、 β 轴分量; M 为滑模增益; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。由并网逆变器的数学模型和式(6)可得电流观测误差,如式(7)所示。

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_\alpha \\ \bar{i}_\beta \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} \bar{i}_\alpha \\ \bar{i}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\alpha) \\ M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\beta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ 、 $\bar{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$ 分别为电流观测误差的 α 、 β 轴分量。

为了验证滑模观测器的滑模动态存在且稳定,定义李雅普诺夫函数 V 满足:

$$V = (\bar{i}_\alpha^2 + \bar{i}_\beta^2)/2 \quad (8)$$

对式(8)求导可得:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{R}{L}(\bar{i}_\alpha^2 + \bar{i}_\beta^2) + \frac{e_\alpha \bar{i}_\alpha + e_\beta \bar{i}_\beta}{L} - \frac{M}{L}(|\bar{i}_\alpha| + |\bar{i}_\beta|) \quad (9)$$

依据李雅普诺夫稳定性原理,系统稳态时需满

足 $dV/dt < 0$ 。由于式(9)中 $-R(\bar{i}_\alpha^2 + \bar{i}_\beta^2)/L < 0$ 恒成立, 因此, 滑模增益 M 需满足:

$$M > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (10)$$

式(10)给出了滑模增益 M 的设计方法。滑模增益 M 越大, 滑模观测器系统收敛得越快, 但这也会增大滑模噪声。因此, 需要合理地选择滑模增益 M 。

在滑模观测器收敛后, 电流观测误差满足 $\bar{i}_\alpha = 0$, $\bar{i}_\beta = 0$, $d\bar{i}_\alpha/dt = 0$, $d\bar{i}_\beta/dt = 0$ 。此时, 由式(7)可以得到:

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha g} \\ e_{\beta g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\alpha) \\ M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\beta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $e_{\alpha g}$ 、 $e_{\beta g}$ 为估计的电网电压。

实际上, 根据滑模控制理论, 式(11)等号右边的滑模项包含高频滑模噪声和电网电压基波信号2个部分, 而待观测的电网电压仅为滑模项的基频信号, 因此无法直接通过式(11)得到观测的电网电压。

为了根据式(11)计算出电网电压信号, 需要采用低通滤波器对滑模项进行滤波, 消除高频滑模噪声部分, 并同时对其基频信号进行相位和幅值补偿。增加低通滤波器后可得:

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha LPF1} \\ e_{\beta LPF1} \end{bmatrix} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \begin{bmatrix} M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\alpha) \\ M \operatorname{sgn}(\bar{i}_\beta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $e_{\alpha LPF1}$ 、 $e_{\beta LPF1}$ 分别为滤波后电网电压的 α 、 β 轴分量; s 为拉普拉斯算子; ω_c 为低通滤波器的截止频率。

由式(12)可知, 低通滤波器虽然可以滤除滑模项中的高频滑模信号, 但会影响电网电压的基波信号, 这不仅会引起电网电压相位偏移, 而且会产生幅值衰减。因此, 必须对滤波后的滑模项进行相位和幅值补偿, 以获得精确的电网电压。

常规的补偿方法依据电网电压的基波角频率 ω 对电网电压的幅值及相位进行补偿。由式(12)可知, 低通滤波器对电网电压造成的幅值衰减和相位偏移可表示为:

$$\begin{cases} \Delta E = \omega_c / \sqrt{\omega^2 + \omega_c^2} \\ \Delta \theta = \arctan(\omega / \omega_c) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)对滤波后的变量 $e_{\alpha LPF1}$ 、 $e_{\beta LPF1}$ 分别进行相位和幅值补偿, 即可获得精确的电网电压。然而, 该补偿方法对电网频率具有较强的依赖性, 一旦电网频率出现偏差, 由式(13)计算得到的电网电压补偿量就会出现误差, 从而导致观测的电网电压出现偏差。

2.2 基于双低通滤波器的电网电压自适应补偿方法

为了实现电网电压观测, 克服电网电压频率偏差对电网电压观测精度的影响, 本文提出了一种基

于双低通滤波器的电网电压自适应补偿方法。

由于同一个低通滤波器对同一个频率的信号产生的相位延迟和幅值衰减相同, 本文采用相同的低通滤波器对 $e_{\alpha LPF1}$ 、 $e_{\beta LPF1}$ 再次进行低通滤波, 得到的 $e_{\alpha LPF2}$ 、 $e_{\beta LPF2}$ 满足:

$$\begin{bmatrix} e_{\alpha LPF2} \\ e_{\beta LPF2} \end{bmatrix} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \begin{bmatrix} e_{\alpha LPF1} \\ e_{\beta LPF1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(12)可知, 低通滤波器可以滤除滑模项中的高频滑模噪声, 因此, 滤波后电网电压 $e_{LPF1} = e_{\alpha LPF1} + j e_{\beta LPF1}$ 的幅值 E_1 和相位 θ_1 分别为:

$$\begin{cases} E_1 = \sqrt{e_{\alpha LPF1}^2 + e_{\beta LPF1}^2} \\ \theta_1 = \arctan(e_{\beta LPF1} / e_{\alpha LPF1}) \end{cases} \quad (15)$$

同理, 再次滤波后电网电压 $e_{LPF2} = e_{\alpha LPF2} + j e_{\beta LPF2}$ 的幅值 E_2 和相位 θ_2 分别为:

$$\begin{cases} E_2 = \sqrt{e_{\alpha LPF2}^2 + e_{\beta LPF2}^2} \\ \theta_2 = \arctan(e_{\beta LPF2} / e_{\alpha LPF2}) \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知, 低通滤波器所产生的幅值衰减和相位延迟角可表示为:

$$\begin{cases} \Delta E = E_1 / E_2 \\ \Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 \end{cases} \quad (17)$$

通过对比式(13)和式(17)可知, 本文提出的电网电压相位和幅值补偿方法不需要精确的电网角频率, 即可对电网电压的相位与幅值进行补偿, 从而获得精确的电网电压。补偿后电网电压的 α 、 β 轴分量如式(18)所示。

$$\begin{cases} e_{\alpha g} = E_2 (\Delta E)^2 \cos(\theta_2 + 2\Delta\theta) \\ e_{\beta g} = E_2 (\Delta E)^2 \sin(\theta_2 + 2\Delta\theta) \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)估计得到的电网电压代入式(1)~(5)即可预测出下一时刻的电流, 从而实现并网逆变器的无交流电压传感器模型预测控制。

由于本文提出的电网电压观测方法没有用到电网电压的精确角频率, 因此当电网电压频率出现偏差时, 所提方法仍然可以精确地观测电网电压。同时, 由于本文提出的电网电压观测方法使用了2个低通滤波器, 因此, 可对电网电压中存在的背景谐波进行抑制, 从而有助于降低电网电压中的背景谐波对电流控制的影响, 减小电流谐波。

3 整体控制策略

图2给出了本文所提无电网电压传感器模型预测控制方法的整体控制框图, 主要包括电流采样与变换、电网电压观测、参考电流计算、延时补偿及电压矢量在线寻优等部分。图中, m 为循环次数。最终通过目标函数优化比较, 获得最优电压矢量, 实现并网逆变器的无电网电压传感器模型预测控制。

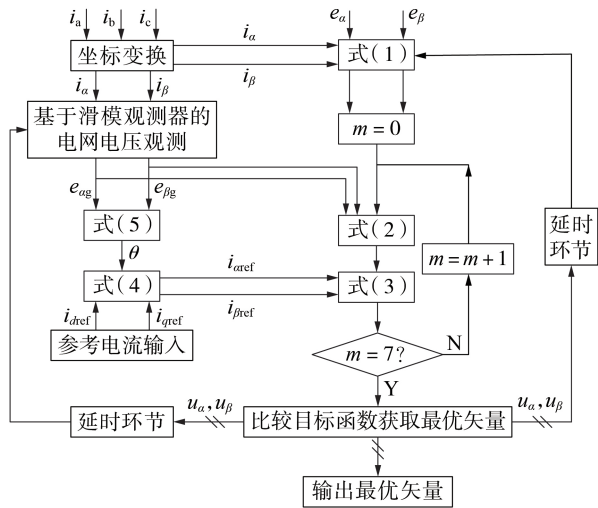


图2 所提方法的整体框图

Fig.2 Whole block diagram of proposed method

4 实验结果

为了验证本文所提改进型无交流电压传感器模型预测控制算法的有效性,建立了如附录中图 A1 所示的实验平台,并进行了详细的对比实验研究。实验中所使用的参数如表 1 所示。该实验系统采用 DSP28335 作为主控制器,逆变器主电路采用 TI 公司的 IPM 模块 7MBP50RJ120 构成,直流电压由 Myway 的 APL- II 双向直流源提供。采用恒河 DLM4000 系列示波器对实验结果进行采集和处理。实验时,逆变器的采样频率设为 15 kHz,死区时间设为 2 μ s,直流侧电压为 250 V。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
电网线电压峰值 e / V	150	截止频率 $\omega_c / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	100π
直流电压 U_{dc} / V	250	滤波电感 L / mH	20
滑模增益 M	110	寄生电阻 R / Ω	0.05
电网频率 f / Hz	50	采样周期 $T / \mu\text{s}$	66.67

为了验证所提方法的有效性,本文通过实验对比研究了常规无交流电压传感器法(使用 2.1 节常规电网电压观测方法)和本文所提方法的动态性能。

附录中图 A2 为理想电网电压下常规无交流电压传感器法和本文所提方法的动态电流波形。在该实验中,有功电流 i_{dref} 由 3 A 突增为 10 A,无功电流 i_{qref} 为 0。对比图 A2(a)、(b)可见,在理想电网条件下 2 种方法可以获得相似的动态性能。图 A3 进一步给出了有功电流 $i_{dref} = 3 \text{ A}$ 、无功电流 $i_{qref} = 0$ 时 2 种方法的电流快速傅里叶变换(FFT)分析结果。对比其稳态电流总谐波畸变率(THD)可见,本文所提方法的电流 THD 有所减小,这是由于在观测电网电压时使用了 2 个低通滤波器,电网背景谐波的影响得到了

进一步抑制。

为了进一步验证所提方法的有效性,在畸变电网条件下对比分析了常规无交流电压传感器法和本文所提方法的控制性能。实验中,通过电网模拟器向电网中注入三相 7 次谐波,其幅值为 8.7 V。设 $i_{dref} = 10 \text{ A}$, $i_{qref} = 0$ 。图 3 给出了注入谐波后的三相电网电压波形,可见此时电网电压出现了非常明显的畸变。此时,2 种方法下的电流波形及电流 FFT 分析结果分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出,与常规无电网电压传感器法相比,畸变电网下本文所提方法的电流 THD 较小,这是由于本文所提方法在观测电网电压时使用了 2 个低通滤波器。图 5 给出了有功电流 $i_{dref} = 10 \text{ A}$ 、无功电流 $i_{qref} = 0$ 时 2 种方法下电流 FFT 分析结果。图中, λ 为电流谐波幅值占基波的百分比。由此可以清晰地看出本文所提方法可以明显降低电流 THD,验证了本文所提方法的有效性。

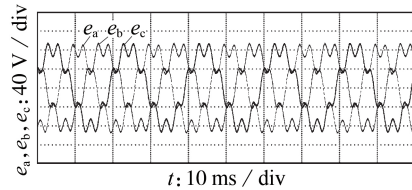
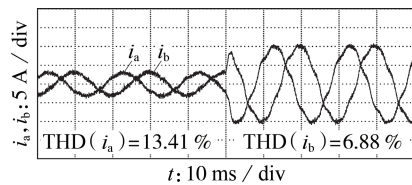
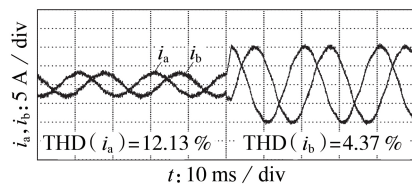


图3 畸变电网电压波形

Fig.3 Waveforms of distorted grid voltage



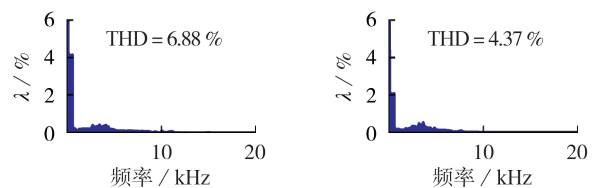
(a) 常规无交流电压传感器法



(b) 本文所提方法

图4 畸变电网下 2 种方法的动态实验结果

Fig.4 Dynamic experimental results of two methods under distorted grid voltage condition



(a) 常规无交流电压传感器法 (b) 本文所提方法

图5 畸变电网下 2 种方法的电流 FFT 分析结果

Fig.5 Current FFT analysis results of two methods under distorted grid condition

此外,如2.2节所述,本文所提方法在电网电压观测过程中没有使用电网电压的角频率,因此该方法无需精确的电网电压角频率就可实现电网电压的频率自适应观测。即当电网电压频率出现偏差时,本文所提方法依然可以实现电网电压的精确观测,具有较强的适应性。

为了进一步验证本文所提方法的有效性,附录中图A4和图6分别给出了电网电压频率为50、40 Hz时采用常规电网电压观测方法和本文所提方法观测得到的电网电压波形。实验中,2.1节常规电网电压观测方法所使用的电网频率恒为50 Hz^[23]。由图A4可见,当电网频率稳定时,2种方法均能够准确地观测电网电压。由图6可见,当电网频率跌落到40 Hz时,由于常规电网电压观测法仍采用50 Hz的频率对电网电压进行相位和幅值补偿,导致观测得到的电网电压幅值偏大,相位超前。而本文所提方法由于不依赖于实际的电网电压频率,即使电网频率发生偏差,也可以观测得到精确的电网电压。

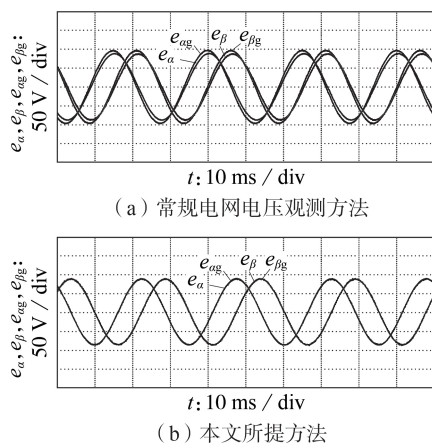


图6 实际电网频率为40 Hz时观测的电网电压
Fig.6 Observed grid voltage when actual grid frequency is 40 Hz

为了进一步验证频率偏差对电流控制的影响,进行了如下对比实验研究。实验时,电网频率分别设为40、50 Hz。常规电网电压观测方法采用固定50 Hz的频率对电网电压进行相位和幅值补偿^[23]。设 $i_{dref}=10 \text{ A}$, $i_{qref}=0$ 。实验结果如附录中图A5和图7所示。

附录中图A5给出了实际电网频率为50 Hz时2种方法的控制效果。通过对比可知,2种方法具有类似的电流控制效果。当实际电网频率为40 Hz时,由图6(a)、7(a)可见,由于观测的电网电压超前于实际电网电压,此时的实际电流超前于实际电网电压。由此可见,由于常规电网电压观测法依赖于精确的电网频率,因此,一旦电网频率出现偏差,电网电压观测精度会明显降低,并影响电流的解耦控

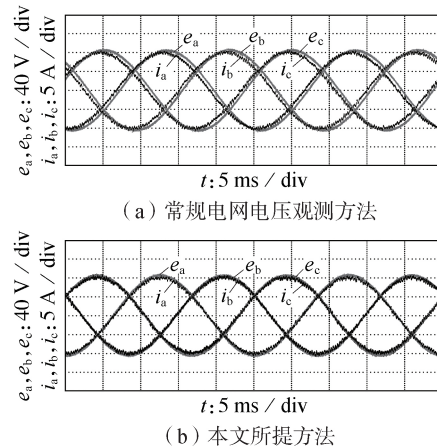


图7 实际电网频率为40 Hz时的电流波形
Fig.7 Current waveforms when actual grid frequency is 40 Hz

制精度。而由图7(b)可见,本文所提方法在电网频率出现偏差时仍具有较高的电流控制精度,这再次说明了本文所提方法的有效性。

5 结论

为实现并网逆变器的无交流电压传感器模型预测控制,提高电网电压观测精度和电流控制精度,研究并提出了一种基于滑模观测器和双低通滤波器的电网电压频率自适应观测方法,并设计了一种基于电网电压观测值的并网逆变器模型预测电流控制策略。所提电网电压观测法不仅可以抑制电网电压背景谐波对电流控制的影响,从而降低电流谐波,而且可以在无需已知电网电压精确角频率的前提下实现电网电压的频率自适应观测,从而可提高电流解耦控制精度。详细的对比实验结果验证了所提方法的有效性。

此外,在无电网电压传感器控制系统中,变换器启动时如何获得电网电压的幅值和相位是一个非常重要的问题,也在诸多文献中得到了研究。然而,由于本文的研究重点是对频率偏移具有鲁棒性的电网电压观测方法,因此,未对启动时电网电压的初始相位辨识进行深入研究,但启动时可参考文献[24]进行电网电压的初始相位辨识。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭晓瑞,王培良,郭吉丰,等. 光伏并网逆变器母线电压纹波的分析与控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):48-53.
GUO Xiaorui, WANG Peiliang, GUO Jifeng, et al. Analysis and control of bus voltage ripples for grid-connected photovoltaic inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):48-53.
- [2] 方刚,杨勇,卢进军,等. 三相光伏并网逆变器电网高阻抗谐波抑制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):109-116.

- FANG Gang, YANG Yong, LU Jinjun, et al. Resonance suppression method of high impedance power grid for three-phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):109-116.
- [3] 尹晨旭, 刘邦, 熊璇, 等. 基于并网逆变器混合实时仿真系统的PWM脉冲宽度误差分析与建模[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2):83-89.
- YIN Chenxu, LIU Bang, XIONG Xuan, et al. Analysis of PWM pulse width error and modeling of grid-connected inverter in HIL simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2):83-89.
- [4] 杨兴武, 冀红超, 甘伟. 基于模型预测控制的并网逆变器开关损耗优化方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8):84-89.
- YANG Xingwu, JI Hongchao, GAN Wei. Switching loss optimization based on model predictive control for grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):84-89.
- [5] 尚姝钰, 陈豪, 姜素霞, 等. 基于模型预测控制的有源电力滤波器开关损耗优化设计[J]. 轻工学报, 2017, 32(2):103-108.
- SHANG Shuyu, CHEN Hao, JIANG Suxia, et al. Optimized design of active power filter switching loss based on model predictive control[J]. Journal of Light Industry, 2017, 32(2):103-108.
- [6] 郭磊磊, 韩东许, 芮涛. 基于混合电压矢量预选的逆变器模型预测共模电压抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1):33-39.
- GUO Leilei, HAN Dongxu, RUI Tao. Hybrid voltage vector pre-selection strategy based model predictive control method for inverters to reduce common-mode voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):33-39.
- [7] 杜少通, 伍小杰, 周娟, 等. 一种采用虚拟磁链模型预测的新型PWM算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3):688-694.
- DU Shaotong, WU Xiaojie, ZHOU Juan, et al. A novel algorithm of PWM using virtual flux model prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3):688-694.
- [8] TAO Y, WU Q, WANG L, et al. Voltage sensorless predictive direct power control of three-phase PWM converters[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(5):1009-1018.
- [9] 吴凤江, 孙秀冬, 孙力, 等. 无交流电压传感器并网逆变器的控制策略及其改进[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7):33-37.
- WU Fengjiang, SUN Xiudong, SUN Li, et al. Control strategy of grid-connected converter without AC voltage sensor and its improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):33-37.
- [10] 侯兆然. 基于虚拟磁链定向的PWM整流器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21):105-109.
- HOU Zhaoran. Research on control method of PWM rectifier based on virtual flux orientation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21):105-109.
- [11] 罗德荣, 周小艳, 姬小豪, 等. 基于虚拟磁链的PWM整流器模型预测直接功率控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):123-129.
- LUO Derong, ZHOU Xiaoyan, JI Xiaohao, et al. Virtual-flux-based model predictive direct power control for PWM rectifiers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):123-129.
- [12] BOZORGI A, SANATKAR M, MOHAMMAD R, et al. Improved grid voltage sensorless control strategy for railway power conditioners[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(12):2454-2461.
- [13] SUUL J, LUNA A, RODRÍGUEZ P, et al. Virtual-flux-based voltage-sensor-less power control for unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9):4071-4087.
- [14] SUUL J, LUNA A, RODRÍGUEZ P, et al. Voltage-sensor-less synchronization to unbalanced grids by frequency-adaptive virtual flux estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7):2910-2923.
- [15] RAHOUI A, BECHOUCHE A, SEDDIKI H, et al. Grid voltages estimation for three-phase PWM rectifiers control without AC voltage sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1):859-875.
- [16] ABDEL-RADY Y, EL-SAADANY E, SALAMA M. Adaptive grid-voltage sensorless control scheme for inverter-based distributed generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3):683-694.
- [17] FANTINO R, BUSADA C, SOLSONA J. Observer-based grid-voltage sensorless synchronization and control of a VSI-LCL tied to an unbalanced grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7):4972-4981.
- [18] KUKKOLA J, HINKKANEN M. State observer for grid-voltage sensorless control of a converter under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2018, 54(1):286-297.
- [19] YANG H, ZHANG Y, LIANG J, et al. Sliding-mode observer based voltage-sensorless model predictive power control of PWM rectifier under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7):5550-5560.
- [20] YANG H, ZHANG Y, ZHANG N, et al. A voltage sensorless finite control set-model predictive control for three-phase voltage source PWM rectifiers[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 2(2):52-59.
- [21] MOHAMED Y, RAHMAN M, SEETHAPATHY R. Robust line-voltage sensorless control and synchronization of LCL-filtered distributed generation inverters for high power quality grid connection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1):87-98.
- [22] KUKKOLA J, HINKKANEN M. State observer for grid-voltage sensorless control of a converter equipped with an LCL filter: direct discrete-time design[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4):3133-3145.
- [23] LI H, LIN M, YIN M, et al. Three-vector-based low-complexity model predictive direct power control strategy for PWM rectifier without voltage sensors[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1):240-251.
- [24] LIU T, XIA C, SHI T. Robust model predictive current control of grid-connected converter without alternating current voltage sensors[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(12):2934-2944.

作者简介:



郭磊磊

郭磊磊(1987—),男,河南新乡人,讲师,博士,主要研究方向为逆变器及交流电机的模型预测控制等(E-mail:2006guoleilei@163.com);

金楠(1982—),男,河南商丘人,教授,博士,主要研究方向为并网逆变器的模型预测控制(E-mail:jinnan@zzuli.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Sliding mode observer based AC voltage sensorless model predictive control for grid-connected inverter

GUO Leilei¹, JIN Nan¹, LI Yanyan¹, DAI Linwang², WANG Huaqing¹, ZHANG Kaixuan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To improve the operational reliability of grid-connected inverters, and reduce the fault influence of AC voltage sensors, a grid voltage and frequency adaptive observation method based on sliding mode observer and double low-pass filters is studied and proposed, and a predictive current control strategy based on the observed grid voltage is designed for grid-connected inverters. The proposed grid voltage observation method can overcome the influence of frequency deviation on grid voltage observation, and improve the grid voltage observation accuracy. Meanwhile, because of the utilization of the low-pass filter, the influence of the grid voltage harmonic on the current control can be suppressed to a certain extent. Detailed comparative experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: grid-connected inverter; sliding mode observer; AC voltage sensorless; model predictive control; low-pass filter

(上接第107页 continued from page 107)

Improved flexible virtual inertial control considering SOC of energy storage and characteristics of frequency recovery

MENG Jianhui, PENG Jialin, WANG Yi, WANG Hui, ZHAO Penghui

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The photovoltaic and energy storage system based on VSG (Virtual Synchronous Generator) control can provide virtual inertia for power grid to enhance the system stability. However, SOC (State Of Charge) of the source-end energy storage and the characteristics of system frequency recovery present essential limiting effect on the flexible adjustment of virtual inertia. Aiming at this problem, an improved flexible virtual inertia control method is proposed based on the existing research. On the one hand, the virtual inertia can be adjusted independently according to SOC in the limit operating state of energy storage, so that the deep overcharge and discharge of the energy storage can be avoided. On the other hand, the virtual inertia is adjusted according to the variation of frequency in stages during the safe operation of energy storage, so that reducing the system frequency deviation and accelerating the recovery speed. In addition, the small-signal model of the islanding four-terminal microgrid is built. The influence of the key control parameters on system stability is analyzed, and the design principles of parameters are explored. Finally, the effectiveness and the superiority of the proposed control method are verified by the hardware-in-the-loop experiments, and the engineering practical value of photovoltaic and energy storage VSG control technology is improved.

Key words: virtual synchronous generator; state of charge; characteristics of frequency recovery; virtual inertia; small-signal modeling; stability analysis

附录

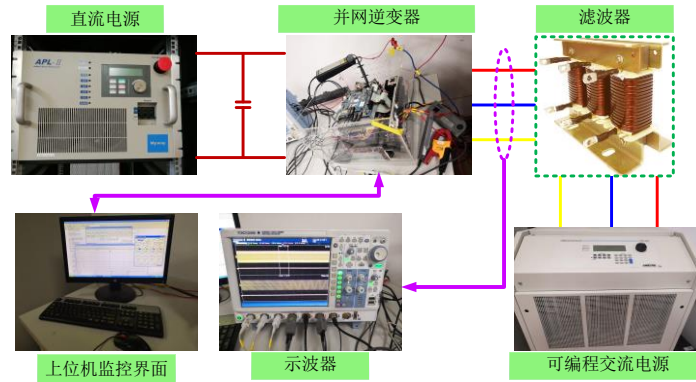
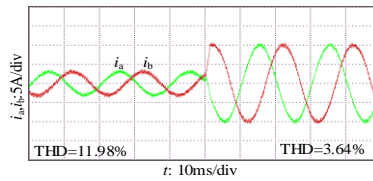
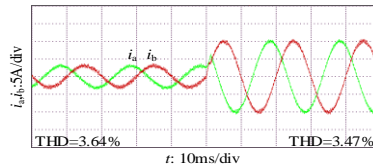


图 A1 实验平台图

Fig.A1 Photo of the experimental platform



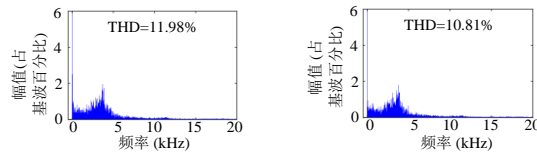
(a) 常规无交流电压传感器法



(b) 本文所提方法

图 A2 理想电网下 2 种方法的动态实验结果

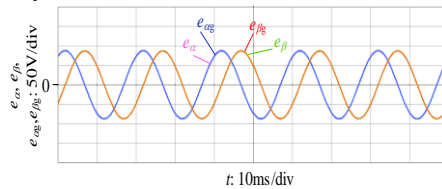
Fig.A2 Dynamic experimental results of two methods under ideal grid voltage conditions



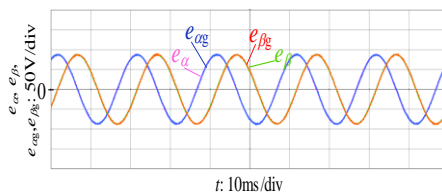
(a) 常规无交流电压传感器法 (b) 本文所提方法

图 A3 理想电网下 2 种方法的电流 FFT 分析结果

Fig.A3 Current FFT analysis results of two methods under ideal grid voltage conditions



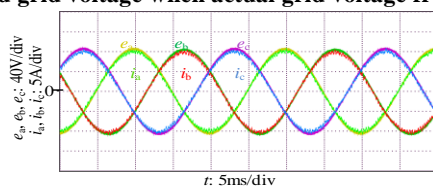
(a) 常规电网电压观测方法



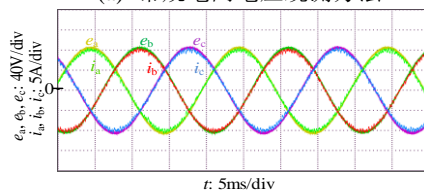
(b) 本文所提方法

图 A4 实际电网电压频率为 50 Hz 时观测的电网电压

Fig.A4 Observed grid voltage when actual grid voltage frequency is 50 Hz



(a) 常规电网电压观测方法



(b) 本文所提方法

图 A5 实际电网电压频率为 50 Hz 时的电流波形

Fig.A5 Current waveforms when the actual grid voltage frequency is 50 Hz